



## Índex

Preàmbul	1
1. Objectius	3
2. Justificació	5
3. Introducció	7
3.1. Contaminació atmosfèrica	7
3.1.1. Marc introductori	7
3.1.2. Compostos Orgànics Volàtils (COVs)	9
3.1.3. Anàlisi de la problemàtica dels COVs	11
3.2. Marc legal	13
3.2.1. Directiva europea 1996/61/CE	14
3.2.2. Reial Decret 117/2003	18
3.3. Antecedents	23
3.4. Tècniques de tractament de COVs	26
3.4.1. Tractaments recuperatius	26
3.4.1.1. Adsorció	26
3.4.1.2. Condensació	29
3.4.1.3. Absorció	30
3.4.2. Tractaments finalistes	31
3.4.2.1. Tractaments tèrmics	31
3.4.2.2. Tractaments biològics	34
4. Estudi de cas	39
4.1. Àmbit d'estudi	39
4.2. Propietats i característiques dels COVs del corrent residual	43
5. Metodologia	47
5.1. Metodologia de l'avaluació econòmica	48
5.1.1. Definició dels objectius i abast	48
5.1.2. Inventari de les dades de costos	48



5.1.3.	Estimació de costos	49
5.1.4.	Avaluació de resultats econòmics	49
5.2.	Metodologia de l'avaluació ambiental	49
5.2.1.	Definició dels objectius i abast	49
5.2.2.	Anàlisi de l'inventari	50
5.2.3.	Avaluació d'impacte	51
5.2.4.	Avaluació dels resultats ambientals	52
6.	Elecció dels tractaments	53
6.1.	Tractaments d'adsorció	56
6.1.1.	Principi de funcionament	56
6.1.2.	Adsorció en carbó actiu	58
6.1.3.	Isoterma d'adsorció	59
6.1.4.	Aplicacions	62
6.1.5.	Comentaris sobre la tecnologia	62
6.1.6.	Regeneració dels sistemes d'adsorció	63
6.1.7.	Control de la contaminació de l'aire	66
6.1.7.1.	Adsorció per llit fix regenerable	67
6.1.7.2.	Adsorció amb equips d'un sol ús o regenerables	68
6.2.	Tractaments d'incineració	68
6.2.1.	Oxidació tèrmica	71
6.2.2.	Oxidació catalítica	74
7.	Estimació de costos	79
7.1.	Adsorbidors	79
7.1.1.	Procediment de disseny	79
7.1.1.1.	Paràmetres per al dimensionament	80
7.1.1.2.	Temps d'adsorció i desorció	80
7.1.1.3.	Estimació dels requeriments de carbó	81
7.1.2.	Estimació de la inversió inicial de capital	82
7.1.2.1.	Cost del carbó	83
7.1.2.2.	Cost del recipient	83
7.1.2.3.	Cost total de l'equip	86
7.1.2.4.	Inversió inicial de capital	86
7.1.3.	Estimació del cost total anual	88
7.1.3.1.	Costos directes anuals	88



7.1.3.2. Costos indirectes anuals	92
7.1.3.3. Ingressos per producte recuperat (RC)	93
7.1.3.4. Cost total anual (CTA)	94
7.2. Incineradors	95
7.2.1. Procediment de disseny	95
7.2.1.1. Càlculs comuns a les unitats tèrmiques i catalítiques	95
7.2.1.2. Càlculs específics a les unitats tèrmiques	98
7.2.1.3. Càlculs específics a les unitats catalítiques	102
7.2.2. Estimació de la inversió inicial de capital	106
7.2.2.1. Cost de l'equip	107
7.2.2.2. Cost de la instal·lació	112
7.2.3. Estimació del cost anual total	113
7.2.3.1. Costos directes anuals	113
7.2.4. Estimació del cost anual total	116
7.2.4.1. Costos indirectes anuals	116
8. Avaluació ambiental	123
8.1. Consum energètic	123
8.1.1. Electricitat	123
8.1.2. Gas natural	124
8.2. Consum material	125
8.2.1.1. Carbó actiu	125
8.2.2. Catalitzador (TiO <sub>2</sub> )	126
9. Sensibilitat dels paràmetres de disseny	129
9.1. Paràmetres del tractament d'adsorció	129
9.1.1. Capacitat d'equilibri	129
9.1.2. Temps d'adsorció del sistema	132
9.1.3. Velocitat superficial del corrent	133
9.2. Paràmetres del tractament d'oxidació	136
10. Resultats i elecció de la millor alternativa	139
10.1. Anàlisi de la avaluació econòmica	139
10.2. Anàlisi de la avaluació ambiental	141
10.3. Elecció de la millor alternativa	143
11. Glossari	144
12. Bibliografia	145





## Índex de Taules

Taula 1.	Classificació dels COVs en funció de la seva volatilitat	9
Taula 2.	Classificació dels COVs en funció dels efectes que produeixen	10
Taula 3.	Classificació dels COVs en funció de les seves característiques	10
Taula 4.	Riscos que afecten a la qualitat ambiental i a la salut	11
Taula 5.	Marc legal de referència	14
Taula 6.	Valors límits d'emissió difusa segons el llindar de consum dels dissolvents	18
Taula 7.	Valors límits d'emissió total segons el llindar de consum de dissolvents	21
Taula 8.	Principals diferències entre la T.A.Luft i la Directiva 1999/13/CE	23
Taula 9.	Emissions de COVs per impressió i lacat	25
Taula 10.	Comparació de les diferents tecnologies pel tractament dels COVs	38
Taula 11.	Resum del total de COVs continguts a les laques	39
Taula 12.	Consum de dissolvents emesos per l'empresa	43
Taula 13.	Paràmetres del corrent residual a tractar	45
Taula 14.	Valors específics per l'avaluació econòmica en el cas dels adsorbidors	79
Taula 15.	Factors específics segons el tipus de material de fabricació.	86
Taula 16.	Metodologia i càlcul de la inversió inicial de capital	87
Taula 17.	Metodologia i càlcul del cost total anual pel sistema d'adsorció	94
Taula 18.	Especificacions inicials pel disseny d'incineradors tèrmics i catalítics	96
Taula 19.	Especificacions característiques pel disseny d'incineradors tèrmics	99
Taula 20.	Càlcul dels paràmetres per cada tipus d'incinerador, en funció de la recuperació	106
Taula 21.	Tipus d'incinerador en funció del cabal total de gas	107
Taula 22.	Caiguda de pressió típica per l'incinerador	114
Taula 23.	Caiguda de pressió típica en funció dels percentatges de recuperació	115
Taula 24.	Costos totals d'energia elèctrica per cada tipus d'incinerador, en funció del seu	116
Taula 25.	Model de càlcul per la inversió inicial de capital en incineradors.	117
Taula 26.	Model de càlcul pels costos anuals totals en incineradors.	118
Taula 27.	Inversió del capital total per l'incinerador tèrmic	119
Taula 28.	Inversió del capital total per l'incinerador catalític de llit fluïditzat	120
Taula 29.	Inversió del capital total per l'incinerador catalític de llit fix	121
Taula 30.	Inversió del cost total arrodonit pels sistemes d'incineració corresponents a l'estudi	122
Taula 31.	Emissions (Kg) de CO <sub>2</sub> per KWh consumit	123
Taula 32.	Quantitat de CO <sub>2</sub> emès a l'atmosfera en funció del consum elèctric de l'incinerador	124
Taula 33.	Emissió de CO <sub>2</sub> en funció del consum de combustible auxiliar dels incineradors	125
Taula 34.	Contribució energètica en la producció d'un Kg de carbó actiu	125
Taula 35.	Càrregues ambientals en Kg de CO <sub>2</sub> anuals per als tractaments avaluats	128
Taula 36.	Comparativa dels costos dels tres tractaments estudiats.	129
Taula 37.	Comparativa dels costos finals dels tres tractaments estudiats, en un període de 10	130





## Índex de gràfics

Fig. 1.	Emissió de contaminació atmosfèrica degut a una xemeneia industrial	7
Fig. 2.	Aspecte de la boira fotoquímica (smog)	13
Fig. 3.	Esquema de determinació de l'emissió difusa	19
Fig. 4.	Procés d'impressió de l'empresa d'estudi	26
Fig. 5.	Emissions derivades del procés d'impressió	26
Fig. 6.	Sistema de tractament per carbó actiu	27
Fig. 7.	Sistema típic d'adsorbidor de carbó actiu de llit fix de dos llits, operant contínuament	28
Fig. 8.	Incinerador tèrmic no recuperatiu	32
Fig. 9.	Incinerador tèrmic recuperatiu	32
Fig. 10.	Incinerador catalític	33
Fig. 11.	Esquema del tractament de biofiltració	34
Fig. 12.	Esquema del tractament de Biosorció	36
Fig. 13.	Esquema del tractament de Biopercolació	37
Fig. 14.	Sistema de tractament per biotrickling	37
Fig. 15.	Esquema de la metodologia per a l'avaluació ambiental i econòmica	47
Fig. 16.	Zones d'aplicació de les tècniques de recuperació	54
Fig. 17.	Capacitat d'adsorció d'una columna de carbó actiu	61
Fig. 18.	Sistema d'adsorció per oscil·lació tèrmica (regeneració al vapor)	63
Fig. 19.	Sistema d'adsorció per regeneració al buit	64
Fig. 20.	Concentrador de compostos orgànics volàtils	64
Fig. 21.	Sistema d'adsorció per oscil·lació de pressió	65
Fig. 22.	Incinerador tèrmic	71
Fig. 23.	Comparació de costos de tipus d'equip o incinerador	108
Fig. 24.	Corbes de cost dels incineradors tèrmics, recuperatius, segons el percentatge de recuperació	109
Fig. 25.	Costos de l'equip d'incineradors catalítics de llit fix segons el percentatge de recuperació	111
Fig. 26.	Corbes de cost dels incineradors catalítics de llit fluiditzat segons el percentatge de recuperació	112
Fig. 27.	Requeriment de carbó en funció de la capacitat d'equilibri	130
Fig. 28.	Energia consumida en funció de la capacitat d'equilibri	130
Fig. 29.	Inversió inicial en funció de la capacitat d'equilibri	131
Fig. 30.	Costos anuals en funció de la capacitat d'equilibri	131
Fig. 31.	Requeriment de carbó en funció del temps d'adsorció	132
Fig. 32.	Energia consumida en funció del temps d'adsorció	132
Fig. 33.	Inversió inicial en funció del temps d'adsorció	133
Fig. 34.	Costos anuals en funció del temps d'adsorció	133
Fig. 35.	Cost de l'equip en funció de la velocitat superficial del llit	134
Fig. 36.	Inversió inicial en funció de la velocitat superficial del llit	134
Fig. 37.	Costos anuals en funció de la velocitat superficial del llit	135
Fig. 38.	Energia consumida en funció de la velocitat superficial del llit	135
Fig. 39.	Inversió inicial de capital en funció dels nivells de recuperació energètics	136
Fig. 40.	Costos anuals en funció dels nivells de recuperació energètics	137
Fig. 41.	Consum elèctric en funció dels nivells de recuperació energètics	138







## Agraïments

En primer lloc volem agrair a la Dra. Maria Martin, professora de Ciències Ambientals de la Universitat de Girona i tutora tècnica del projecte, per haver-nos guiat i aconsellat durant tot el seu procés de realització; així com fer-li una especial atenció al Dr. Miquel Rigola, també professor de la Universitat de Girona, el qual ens ha prestat informació de gran interès per l'estudi realitzat.

També voldríem agrair a Rafael Domínguez tota la informació i coneixements transmesos per tal d'elaborar la base del projecte.

A la Consol Blanch, professora de Ciència i Tecnologia dels Aliments de la Universitat de Vic pel temps dedicat i els ajuts rebuts.

Finalment, agrair als nostres familiars més propers les facilitats que ens han donat i els ajuts d'última hora i especialment a en Jordi, per la seva paciència.





## Simbologia

### *Adsorció*

$\Delta_b$	Densitat total del carbó [gr/m <sup>3</sup> ]
$\Delta P_b$	Caiguda de pressió del sistema [m H <sub>2</sub> O]
$\theta_A$	Temps d'adsorció [h]
$\theta_D$	Temps de desorció [h]
$\theta_s$	Hores d'operació del sistema [h]
$C_c$	Cost del carbó [€]
$C_A$	Cost total de l'equip del adsorbidor [€]
$C_{cl}$	Cost de mà d'obra per el reemplaçament del carbó [€]
$C_{cw}$	Cost de l'aigua de refredament [€]
$C_s$	Cost del vapor [€]
$C_v$	Cost del recipient [€]
$CRC_c$	Cost del reemplaçament del carbó [€]
$CRC_s$	Cost de recuperació del capital per el sistema de l'adsorbidor [€]
$CRF_c$	Factor de recuperació del capital per el carbó per una vida del carbó de 5 anys i un 7% de taxes d'interès [€]
$D$	Diàmetre del recipient [m]
$E$	Eficiència de control de COV del l'adosrbidor [%]
$H$	Capçal requerit [m]
$hp_{sf}$	Potència del ventilador del sistema [KW]
$hp_{cwp}$	Potència de la bomba d'aigua de refredament [KW]
$L$	Longitud del recipient [m]
$M_c$	Carga total de carbó per un sistema operant en continu [gr]
$M_c'$	Requeriment de carbó per recipient adsorbidor [gr]



$m_{cov}$	Carga de COV d'entrada [gr/h]
$N_A$	Nombre de llits d'adsorció
$N_D$	Nombre de llits de desorció
$p_{cov}$	Valor de venda del COV recuperat [€]
$P_{cw}$	Preu de l'aigua de refredament [€]
$p_s$	Preu del vapor [€]
$Q'$	Relació de cabal volumètric per recipient adsorbidor [ $m^3/s$ ]
$q_{cw}$	Flux d'aigua de refredament [ $m^3/s$ ]
$R_c$	Relació del cost de l'equip del adsorbidor i el cost del recipient i del carbó
$RC$	Recuperació de crèdits [€]
$S$	Àrea superficial del recipient [ $m^2$ ]
$s$	Gravetat específica del fluid relatiu a l'aigua a 60°F
$t_{a,g}$	Tolerància permesa en la distribució del gas [m]
$t_b$	Espessor del llit de carbó [m]
$ICT$	Inversió del capital total [€]
$v_b$	Velocitat superficial del llit [m/s]
$w_c$	Capacitat de treball del carbó [gr COV/gr carbó]
$w_e$	Capacitat d'equilibri del carbó en l'entrada de l'adsorbidor [gr COV/gr carbó]

## *Oxidació*

$\Delta h_{cw}$	Calor de combustió del corrent residual
$\Delta h_{ci}$	Calor de combustió del component i a 25°C
$C_{pm \text{ aire}}$	Capacitat calorífica de l'aire entre 77°F i 1375°F
$EC$	Cost de l'equip
$LEL_{mix}$	Límit inferior d'explosivitat de la barreja de components
$LEL_j$	Límit inferior d'explosivitat del component j
$n$	Nombre de components combustibles en la barreja
$Q_{af}$	Requeriments de combustible auxiliar



$T_{fi}$	Temperatura d'operació del incinerador
$T_{fo}$	Temperatura del gas de sortida
$T_{wi}$	Temperatura del gas residual d'entrada
$T_{wo}$	Temperatura del gas residual al final del preescalfador
$V_{cat}$	Volum del catalitzador
$x_i$	Fracció volumètrica del component combustible





## Acrònims

BREF	BAT Reference Document
COV	Compost orgànic volàtil
EPA	Environmental Protection Agency
USEPA	Environmental Protection Agency of Unitat States
FII	Fòrum d'intercanvi d'informació
GAC	Granular Activated Carbon
GWP	Global Warming Potencial
IIAA	Intervenció Intergal de l'Administració Ambiental
IPPC	Integrated Pollution Prevention and Control
LEL	Lower Explosive Limit
MTD	Millor tècnica disponible
OCR	Oxidació catalítica regenerativa
OTR	Oxidació tèrmica regenerativa
PAC	Powder Activated Carbon

## Equivalències

Sistema americà		Sistema internacional		Equivalències
Pound	lb	Grams	g	1 lb = 453,59 g
Foot	ft	Metres	m	1 ft = 0,304 m
Square foot	ft <sup>2</sup>	Metres quadrats	m <sup>2</sup>	1 ft <sup>2</sup> = 0,093 m
Cubic foot	ft <sup>3</sup>	Metres cúbics	m <sup>3</sup>	1 ft <sup>3</sup> = 0,028 m
Gallon	gal	Litres	l	1 gal = 4,546 l
		Metres cúbics	m <sup>3</sup>	1 gal = 0,004546 m <sup>3</sup>
Inch	in	metres	M	1 in = 0,0254 m
British thermal unit	BTU	Kilowatt hora	KWh	1 BTU = 2,93·10 <sup>-4</sup> KWh
Fahrenheit	°F	Kelvin	K	1°F = 256 K
		Celsius	°C	1°F = -17,222 °C
horsepower	hp	Kilowatt	KW	1 hp = 0,746 KW

